

Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), к. т. н. **М. Ю. Фёдоров**, к. т. н. **М. А. Волосова**

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «Станкин»,
Москва, Россия

УДК 621.778.1.073:666.3]:669.018.25

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОМПЛЕКСА ХАРАКТЕРИСТИК НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГРАНИЦЫ КЕРАМИКА – ПОКРЫТИЕ К ИЗМЕНЕНИЮ СВОЙСТВ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭТОЙ СИСТЕМЫ

Определена чувствительность предложенного комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика – покрытие к изменению свойств структурных элементов этой системы. Установлено, что чувствительность комплекса зависит от условий внешнего нагружения. Рекомендовано применение комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика – покрытие при проектировании керамических изделий с покрытием.

Ключевые слова: керамика, покрытие, приграничный слой, напряженное состояние.

ВВЕДЕНИЕ

Современная методология проектирования керамических изделий для разных областей применения, основанная на интуитивном подходе к их конструктивному оформлению, не способна обеспечить требуемые показатели надежности этих изделий [1–4]. Отсутствуют инженерные методы расчета керамических изделий, учитывающие специфику их напряженного состояния и разрушения в определенных условиях эксплуатации [5]. Еще более проблемным является процесс проектирования керамических изделий с одно- и многослойными покрытиями [6–9]. Функциональные покрытия, залечивающие поверхностный слой керамики, значительно усложняют напряженное состояние и процесс разрушения керамических изделий [10–13]. В частности, различия в свойствах структурных элементов керамики и покрытия приводят к формированию сложного напряженного состояния на их границе, в результате чего в этой локальной области образуются структурные дефекты и зарождаются трещины [14, 15]. Эти трещины оказывают негативное влияние на надежность керамических изделий при эксплуатации [16]. По этой причине важно иметь метод анализа напряженного состояния границы керамика – покрытие на этапе проектирования керамических деталей.

В работе [17] предложен комплекс характеристик, позволяющий оценить напряженное со-

стояние границы керамика — покрытие. Однако чувствительность этого комплекса к изменению свойств элементов этой системы не изучена, что не позволяет его рекомендовать при проектировании керамических изделий с покрытием. Актуальность решения этой задачи определяется тем, что при проектировании керамических изделий с покрытиями в качестве исходных параметров задаются свойства элементов системы керамика – покрытие и данные по состоянию технологической среды [18]. Причем незначительное изменение значений исходных параметров может существенно повлиять на проектное решение, зависящее от целого ряда условий, в том числе от напряженного состояния границы керамика – покрытие [19].

Учитывая эти обстоятельства, в настоящей работе поставлена цель — оценить чувствительность предложенного комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика – покрытие к изменению свойств структурных элементов этой системы на примере керамики на основе нитрида кремния и однослойного покрытия из карбида и нитрида титана. Для достижения этой цели систематизированы результаты численных экспериментов по исследованию напряженного состояния границы керамика – покрытие, выполненных как в настоящей работе, так и ранее опубликованных статьях [17, 20, 21].

МОДЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сформированная модель исследования включает первоначальное проведение численных экспериментов по расчету напряжений



В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

Структурный элемент	Плотность ρ , г/см ³	Модуль упругости E , ГПа	Коэффициент Пуассона μ	Температурный коэффициент линейного расширения (20–1500 °C) $\alpha \cdot 10^6$, 1/град	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·град)
Si ₃ N ₄	3,20	300	0,25	3,20	1001,7 T ^{-0,63}
Y ₂ O ₃	4,90	250	0,22	7,90	686,1 T ^{-0,82}
TiC	4,90	484	0,22	7,95	23,2 e ^{0,0002T}
TiN	5,44	440	0,25	9,30	36,6 e ^{0,00045T}

σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и интенсивности напряжений σ_i ($\sigma_i = \sqrt{\sigma_{11}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}^2 + 4\sigma_{12}^2}$) в поверхностном слое керамики (ПСК) на основе Si₃N₄ и поверхностного слоя покрытия (ПСП) из TiC. С использованием результатов расчетов определены следующие характеристики неоднородности напряжений в ПСК и ПСП: наибольшее σ_{\max} , наименьшее σ_{\min} , среднее $\sigma_{\text{ср}}$ значения; диапазон изменения Σ ; стандартное отклонение s и число N изменения знака нормальных (σ_{11} , σ_{22}) и касательных (σ_{12}) напряжений, а также интенсивности напряжений σ_i ; в выборке из 20 контрольных точек (КТ). Затем с использованием этих данных определены следующие характеристики границы керамика на основе Si₃N₄ – TiC-покрытие: $\sigma_{\max}^{\text{ГР}}$, $\sigma_{\min}^{\text{ГР}}$, $\sigma_{\text{ср}}^{\text{ГР}}$, $\Sigma^{\text{ГР}}$ и $s^{\text{ГР}}$ рассчитанными как среднее арифметическое σ_{\max} , σ_{\min} , $\sigma_{\text{ср}}$, Σ и s значений интенсивности напряжений σ_i в ПСК и ПСП.

На завершающем этапе исследования проанализирована чувствительность комплекса характеристик напряженного состояния границ керамика на основе Si₃N₄ – TiC-покрытие и керамика на основе Si₃N₄ – TiN-покрытие к изменению свойств структурных элементов этой системы (см. таблицы). Этот комплекс включает следующие характеристики: $\sigma_{\max}^{\text{ГР}}$, $\sigma_{\min}^{\text{ГР}}$, $\sigma_{\text{ср}}^{\text{ГР}}$, $\Sigma^{\text{ГР}}$ и $s^{\text{ГР}}$.

Моделирование выполняли в автоматизированной системе термо-прочностных расчетов RKS-ST v.1.0 [22], созданной на основе построенных микроструктурной и математической моделей [23, 24]. Использовали расчетную схему, приведенную в [21], и две системы: в системе № 1 зерно и матрица были выполнены из Si₃N₄, а межзеренная фаза — из Y₂O₃; а в системе № 2 зерно — из TiC, межзеренная фаза — из Y₂O₃ и матрица — из Si₃N₄. Эту конструкцию нагружали тепловым потоком и комбинированной нагрузкой (тепловой поток, сосредоточенная и распределенная силы). Для анализа структурной неоднородности напряжений в ПСК и ПСП, а также напряженного состояния границы керамика – покрытие использовали метод контрольных точек [25]. В ПСК и ПСП выделили по двадцать КТ (КТ1–КТ20 в ПСК и КТ21–КТ40 в ПСП).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате расчета температур в ПСК и ПСП разных систем под действием теплового потока $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м² (коэффициент теплоотвода с поверхностей, свободных от теплового потока, в

окружающую среду $h = 10^5$ Вт/м²·град) установлено, что кривые температур в ПСК и ПСП обеих систем имеют одинаковый вид. В качестве примера «типичной кривой», на рис. 1 показана кривая изменения температуры в ПСК системы № 1. Видно, что эта кривая состоит из трех участков: на первом участке температура резко увеличивается, на втором – температура практически не изменяется и на третьем участке – температура резко уменьшается. Проанализируем количественные характеристики теплового состояния ПСК и ПСП обеих систем.

Температура в ПСК системы № 2 увеличивается с 265 до 1112 °C на участке КТ1–КТ8, а на участке КТ15–КТ20 — уменьшается до 468 °C. В ПСП этой системы температура увеличивается с 265 до 1127 °C на участке КТ21–КТ28, а на участке КТ35–КТ40 — уменьшается до 489 °C. Разница между наибольшими значениями температур в ПСК (1116 °C) и ПСП (1135 °C) системы № 2 составляет 1,7 %.

Результаты расчетов напряжений в ПСК и ПСП разных систем под действием теплового потока $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м² показаны на рис. 2. Формы кривых напряжений для ПСК и ПСП обеих систем существенно отличаются. Например, напряжения σ_{11} в ПСК системы № 1 на участках КТ9–КТ13 и КТ15–КТ19 являются растягивающими, а в ПСП на симметричных участках КТ29–КТ33 и КТ35–КТ39 сжимающими. Напряжения σ_{22} в ПСК системы № 1 на участках КТ2–КТ6 и КТ8–КТ13 являются растягивающими, а в ПСП на симметричных участках КТ22–КТ26 и КТ28–КТ33 сжимающими. Следует отметить пиковое изменение значений σ_{11} и σ_{22} в КТ7 и КТ14 ПСК системы № 1, в ПСП аналогичные пики на кривых отсутствуют.

В ПСК керамики системы № 1 формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 477 МПа — от 242 МПа (КТ1) до -235 МПа (КТ14) при среднем значении $\sigma_{\text{ср}} = 87$ МПа, стандартном отклонении $s = 122$ МПа и числе изменений знака $N = 3$ (см. рис. 2, а). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 694 МПа — от 460 (КТ20) до -234 МПа (КТ7) при $\sigma_{\text{ср}} = 107$ МПа, $s = 144$ МПа и $N = 3$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 553 МПа — от -102 (КТ11) до -655 МПа (КТ20) при $\sigma_{\text{ср}} = -177$ МПа, $s = 124$ МПа и $N = 0$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 1031 МПа — от 205 МПа (КТ3) до 1236 МПа (КТ20) при $\sigma_{\text{ср}} = 351$ МПа и $s = 226$ МПа.

В ПСП системы № 1 формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 1263 МПа — от 248 (КТ21) до -1015 МПа (КТ40) при

$\sigma_{cp} = -276$ МПа, $s = 299$ МПа и $N = 1$ (см. рис. 2, а). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 969 МПа — от 203 (КТ40) до -766 МПа (КТ21) при $\sigma_{cp} = -239$ МПа, $s = 260$ МПа и $N = 1$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 354 МПа — от 96 (КТ21) до -258 МПа (КТ30) при $\sigma_{cp} = -142$ МПа, $s = 101$ МПа и $N = 2$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 669 МПа — от 464 (КТ24) до 1133 МПа (КТ40) при $\sigma_{cp} = 583$ МПа и $s = 183$ МПа.

В ПСК системы № 2 формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 547 МПа — от 251 (КТ1) до -296 МПа (КТ7) при $\sigma_{cp} = -7$ МПа, $s = 166$ МПа и $N = 3$ (см. рис. 2, б). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 660 МПа — от 501 (КТ20) до -159 МПа (КТ7) при $\sigma_{cp} = 47$ МПа, $s = 195$ МПа и $N = 3$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 510 МПа — от -138 (КТ1) до -648 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = -261$ МПа, $s = 122$ МПа и $N = 0$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 948 МПа — от 292 (КТ11) до 1240 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = 504$ МПа и $s = 223$ МПа.

В ПСП формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 1265 МПа — от 249 (КТ21) до -1016 МПа (КТ40) при $\sigma_{cp} = -222$ МПа, $s = 289$ МПа и $N = 1$ (см. рис. 2, б). Диапазон изменения напряжений σ_{22} составляет 974 МПа — от 204 (КТ40) до -770 МПа (КТ22) при $\sigma_{cp} = -196$ МПа, $s = 249$ МПа и $N = 1$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 328 МПа — от 99 (КТ21) до -229 МПа (КТ25) при $\sigma_{cp} = -122$ МПа, $s = 85$ МПа и $N = 2$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 853 МПа — от 282 (КТ31) до 1153 МПа (КТ40) при $\sigma_{cp} = 496$ МПа и $s = 242$ МПа.

Результаты расчетов напряжений в ПСК и ПСП под действием комбинированной нагрузки (сосредоточенная сила $F = 0,1$ Н, распределенная сила $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па и тепловой поток $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м²) показаны на рис. 3. Видно, что кривые для ПСК разных систем различаются. Значения напряжений σ_i в ПСК системы № 1 на участке КТ1 – КТ8 практически не изменяются, а в ПСК системы № 2 на аналогичном участке зафиксировано сначала резкое уменьшение значений σ_i от 454 до 85 МПа (КТ1 – КТ6), а затем резкое увеличение от 85 до 793 МПа (КТ6 – КТ8). Кривые для ПСП разных систем имеют однотипный вид и отличаются значениями σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i .

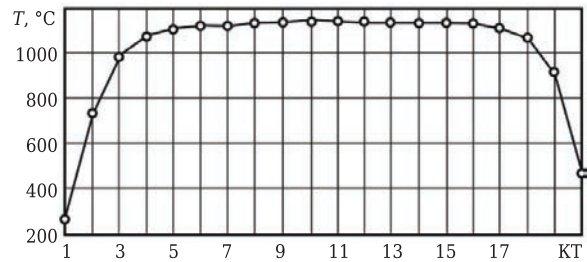


Рис. 1. Кривые распределения температуры в ПСК и ПСП разных систем под действием теплового потока $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м² ($h = 10^5$ Вт/м²·град)

В ПСК системы № 1 под действием комбинированной нагрузки формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 751 МПа — от 139 (КТ9) до -612 МПа (КТ20) $\sigma_{cp} = -42$ МПа, $s = 187$ МПа и $N = 7$ (см. рис. 3, а). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 775 МПа — от 116

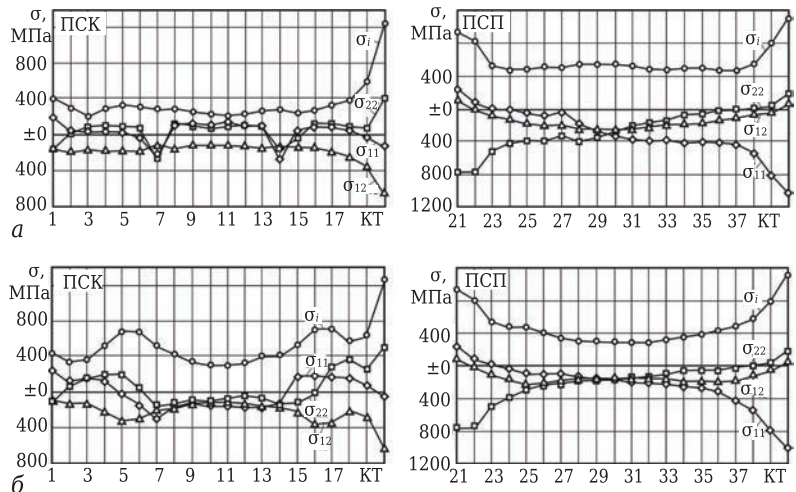


Рис. 2. Напряжения в ПСК и ПСП систем № 1 (а) и № 2 (б) под действием теплового потока $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м²

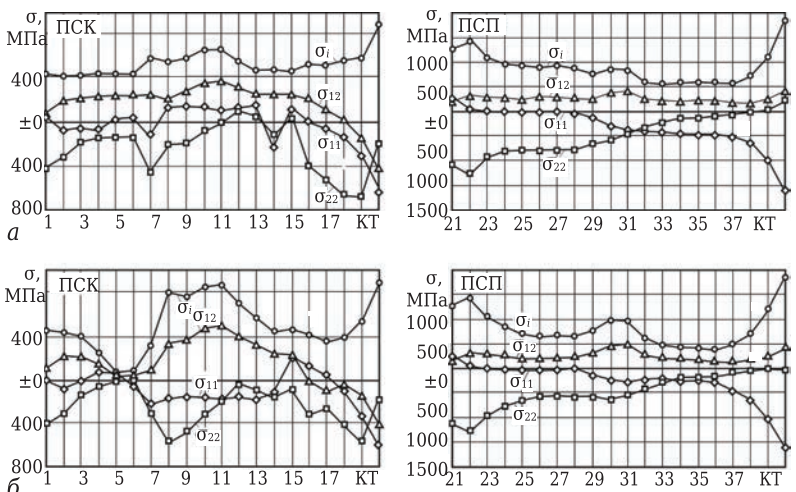


Рис. 3. Напряжения в ПСК и ПСП систем № 1 (а) и № 2 (б) под действием комбинированной нагрузки $F = 0,1$ Н, $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па и $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м²

(КТ12) до -659 МПа (КТ19) при $\sigma_{cp} = -215$ МПа, $s = 228$ МПа и $N = 3$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 807 МПа — от 388 (КТ11) до -419 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = 190$ МПа, $s = 228$ МПа и $N = 1$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 466 МПа — от 438 (КТ3) до 904 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = 550$ МПа и $s = 112$ МПа.

В ПСП системы № 1 формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 1885 МПа — от 268 (КТ21) до -1617 МПа (КТ40) при $\sigma_{cp} = -313$ МПа, $s = 431$ МПа и $N = 1$ (см. рис. 3, а). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 1468 МПа — от 214 (КТ40) до -1254 МПа (КТ22) при $\sigma_{cp} = -473$ МПа, $s = 414$ МПа и $N = 1$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 231 МПа — от 206 (КТ37) до 437 МПа (КТ40) при $\sigma_{cp} = 295$ МПа, $s = 66$ МПа и $N = 0$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 1333 МПа — от 559 (КТ33) до 1892 МПа (КТ40) при $\sigma_{cp} = 907$ МПа и $s = 339$ МПа.

В ПСК системы № 2 формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 819 МПа — от 212 (КТ15) до -607 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = -90$ МПа, $s = 177$ МПа и $N = 4$ (см. рис. 3, б). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 601 МПа — от 19 (КТ6) до -582 МПа (КТ8) при $\sigma_{cp} = -241$ МПа, $s = 184$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 919 МПа — от 499 (КТ11) до -420 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = 142$ МПа, $s = 230$ МПа и $N = 1$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 829 МПа — от 80 (КТ5) до 909 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = 505$ МПа и $s = 246$ МПа.

В ПСП системы № 2 формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 1886 МПа — от 268 (КТ21) до -1618 МПа (КТ40) при

$\sigma_{cp} = -250$ МПа, $s = 427$ и $N = 1$ (см. рис. 3, б). Диапазон изменения напряжений σ_{22} составляет 1271 МПа — от 26 (КТ40) до -1245 МПа (КТ22) при $\sigma_{cp} = -435$ МПа, $s = 365$ МПа и $N = 1$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 345 МПа — от 173 (КТ37) до 518 МПа (КТ31) при $\sigma_{cp} = 294$ МПа, $s = 98$ МПа и $N = 0$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 1496 МПа — от 397 (КТ36) до 1893 МПа (КТ40) при $\sigma_{cp} = 842$ МПа и $s = 383$ МПа.

Результаты оценки чувствительности комплекса характеристик напряженного состояния границ керамика на основе Si_3N_4 – TiC-покрытие и керамика на основе Si_3N_4 – TiN-покрытие к изменению свойств структурных элементов этой системы под действием разных нагрузок показаны на рис. 4–7. На диаграммах комплекс характеристик σ_{cp}^{gr} , σ_{max}^{gr} , σ_{min}^{gr} , Σ^{gr} и s^{gr} обозначен как НСГ — напряженное состояние границы.

Чувствительность комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика – покрытие под действием сосредоточенной силы $F = 0,1$ Н, приложенной под углом 45° показана на рис. 4. Установлено, что значения σ_{cp}^{gr} , σ_{max}^{gr} , σ_{min}^{gr} , Σ^{gr} и s^{gr} , характеризующие напряженное состояние границы керамика – TiN-покрытие в системе № 1 меньше на 1,4, 7, 2, 8 и 4 % соответственно, чем в системе № 2. Значения σ_{cp}^{gr} , σ_{max}^{gr} и Σ^{gr} для границы керамика – TiC-покрытие в системе № 1 меньше на 3; 5 и 6 % соответственно, чем в системе № 2. Значения σ_{min}^{gr} и s^{gr} в этих системах практически не отличаются.

В системе № 1 значения σ_{cp}^{gr} , σ_{max}^{gr} и Σ^{gr} для границы керамика – TiC-покрытие меньше на 4, 2 и 2 % соответственно, чем для границы керамика – TiN-покрытие той же системы при практически одинаковых значениях σ_{min}^{gr} и s^{gr} . В системе № 2 значения σ_{cp}^{gr} , σ_{max}^{gr} , Σ^{gr} и s^{gr} для границы керамика – TiC-покрытие меньше на 2, 4, 4 и 3 %, чем для границы «керамика – TiN-покрытие», при практически одинаковых значениях σ_{min}^{gr} .

Чувствительность комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика – покрытие под действием распределенной силы $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па показана на рис. 5. Видно, что значения σ_{cp}^{gr} , σ_{max}^{gr} , Σ^{gr} и s^{gr} для границы керамика – TiN-покрытие в системе № 1 меньше на 1,5, 8, 12 и 18 % соответственно, чем в системе № 2 при практически одинаковых значениях σ_{min}^{gr} . Значения σ_{cp}^{gr} , σ_{max}^{gr} , Σ^{gr} и s^{gr} для границы керамика – TiC-покрытие в системе № 1 меньше на 1,4, 8, 11 и 15,5 % соответственно, чем в системе № 2 при практически одинаковых значениях σ_{min}^{gr} .

Значения σ_{cp}^{gr} и Σ^{gr} для границы керамика – TiC-покрытие в системе № 1 больше на 2 и 2 % соответственно, чем для границы керамика – TiN-покрытие, при практически равных значениях σ_{min}^{gr} и s^{gr} . В системе № 2 значения σ_{max}^{gr} и Σ^{gr} для границы керамика – TiC-покрытие больше на 1,5 и 2 % соответственно, чем для границы керами-

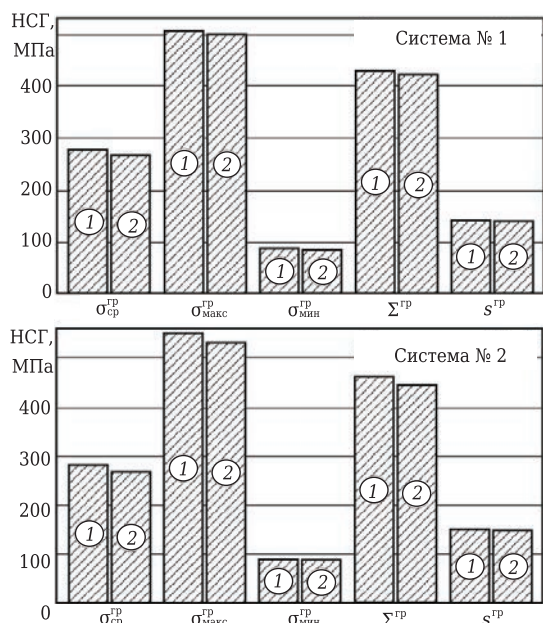


Рис. 4. Оценка чувствительности комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика — покрытие под действием сосредоточенной силы $F = 0,1$ Н для разных систем: 1 — TiN-покрытие 2 — TiC-покрытие

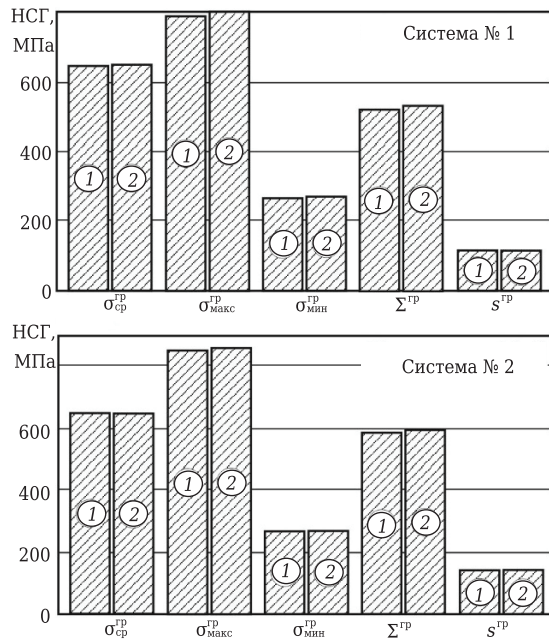


Рис. 5. Оценка чувствительности комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика — покрытие под действием распределенной силы $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па для разных систем: 1 — TiN-покрытие 2 — TiC-покрытие

ка — TiN-покрытие, при практически одинаковых значениях $\sigma_{ср}^{гр}$, $\sigma_{мин}^{гр}$ и $S^{гр}$.

Чувствительность комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика — покрытие под действием теплового потока $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м² (коэффициент теплоотвода $h = 10^5$ Вт/м²·град) показана на рис. 6. Выявлено, что значения $\sigma_{ср}^{гр}$, $\Sigma^{гр}$ и $S^{гр}$, характеризующие напряженное состояние границы керамика — TiN-покрытие в системе № 1 меньше на 6, 13 и 29 % соответственно, чем в системе № 2, при практически одинаковых значениях $\sigma_{макс}^{гр}$ и больших на 28 % значениях $\sigma_{мин}^{гр}$. Значения $\sigma_{ср}^{гр}$, $\Sigma^{гр}$ и $S^{гр}$ для границы керамика — TiC-покрытие в системе № 1 меньше на 7, 6 и 12 % соответственно, чем в системе № 2, при практически одинаковых значениях $\sigma_{макс}^{гр}$ и больших на 17 % значениях $\sigma_{мин}^{гр}$.

Значения $\sigma_{ср}^{гр}$, $\sigma_{макс}^{гр}$, $\sigma_{мин}^{гр}$ для границы керамика — TiC-покрытие в системе № 1 меньше на 21, 2 и 31 % соответственно, чем для границы керамика — TiN-покрытие. Значения $\Sigma^{гр}$ и $S^{гр}$ для границы керамика — TiC-покрытие в системе № 1 больше на 17 и 26 %, чем для границы керамика — TiN-покрытие. В системе № 2 значения $\sigma_{ср}^{гр}$, $\sigma_{макс}^{гр}$, $\sigma_{мин}^{гр}$ для границы керамика — TiC-покрытие меньше на 21, 4 и 24 % соответственно, чем для границы керамика — TiN-покрытие, при больших значениях $\Sigma^{гр}$ и $S^{гр}$ на 8 и 2 % соответственно.

Чувствительность комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика — покрытие под действием комбинированной нагрузки (сосредоточенная сила $F = 0,1$ Н, распределенная сила $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па и тепловой поток

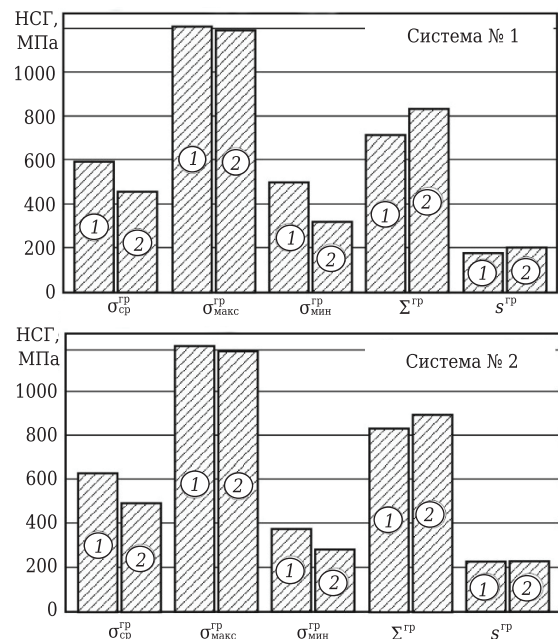


Рис. 6. Оценка чувствительности комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика — покрытие под действием теплового потока $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м² ($h = 10^5$ Вт/м²·град) для разных систем: 1 — TiN-покрытие 2 — TiC-покрытие

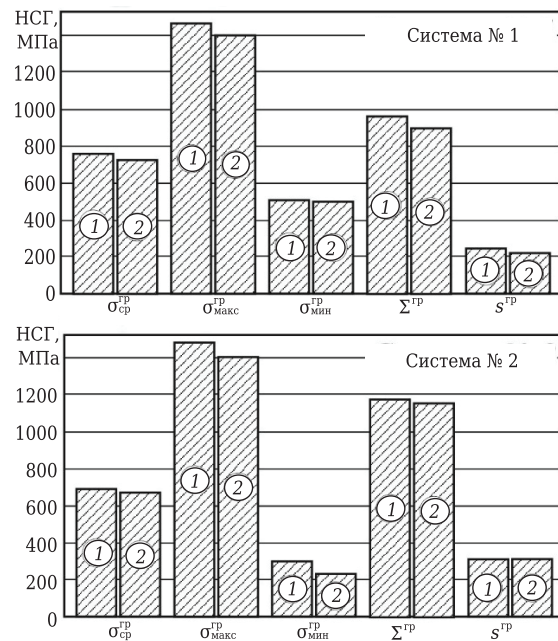


Рис. 7. Оценка чувствительности комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика — покрытие под действием комбинированной нагрузки $F = 0,1$ Н, $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па и $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м² для разных систем: 1 — TiN-покрытие; 2 — TiC-покрытие

$Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м² при коэффициенте теплоотвода $h = 10^5$ Вт/м²·град) показана на рис. 7. Установлено, что значения $\Sigma^{гр}$ и $S^{гр}$ для границы керамика — TiN-покрытие в системе № 1 меньше на 18 и 22 % соответственно, чем в системе № 2 при практически одинаковых значениях $\sigma_{макс}^{гр}$ и больших

на 10 и 70 % значениях $\sigma_{\text{ср}}^{\text{гп}}$ и $\sigma_{\text{мин}}^{\text{гп}}$ соответственно. Значения $\Sigma^{\text{гп}}$ и $s^{\text{гп}}$ для границы керамика – TiC-покрытие в системе № 1 меньше на 23 и 28 % соответственно, чем в системе № 2, при практически одинаковых значениях $\sigma_{\text{макс}}^{\text{гп}}$. Значения $\sigma_{\text{ср}}^{\text{гп}}$ и $\sigma_{\text{мин}}^{\text{гп}}$ больше на 8 % и в 2,1 раза соответственно в системе № 1, чем в системе № 2.

Значения $\sigma_{\text{ср}}^{\text{гп}}$, $\sigma_{\text{макс}}^{\text{гп}}$, $\sigma_{\text{мин}}^{\text{гп}}$, $\Sigma^{\text{гп}}$ и $s^{\text{гп}}$ для границы «керамика – TiC-покрытие» в системе № 1 меньше на 5, 5, 1,5, 7 и 7 % соответственно, чем для границы керамика – TiN-покрытие. В системе № 2 значения $\sigma_{\text{ср}}^{\text{гп}}$, $\sigma_{\text{макс}}^{\text{гп}}$, $\sigma_{\text{мин}}^{\text{гп}}$ и $\Sigma^{\text{гп}}$ для границы керамика – TiC-покрытие меньше на 3, 5, 20 и 1,5 % соответственно, чем для границы керамика – TiN-покрытие при практически одинаковых значениях $s^{\text{гп}}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования выявлена достаточно высокая чувствительность предложенного комплекса характеристик на-

пряженного состояния границы керамика – покрытие к изменению свойств структурных элементов этой системы. Чувствительность этого комплекса зависит от условий внешнего нагружения. Наибольшая чувствительность комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика – покрытие зафиксирована в условиях действия комбинированной нагрузки, а наименьшая — в условиях действия сосредоточенной силы. Полученные результаты позволяют рекомендовать использование предложенного комплекса характеристик напряженного состояния границы керамика – покрытие для формирования рациональных решений при проектировании керамических изделий с покрытием.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 2014/105, проект № 1908).

Библиографический список

1. **Fahrenheitz, William G.** Ultra-high temperature ceramics: materials for extreme environments / William G. Fahrenheitz, Greg E. Hilmas // Scripta Mater. — 2017. — Vol. 129. — P. 94–99.
2. **Кузин, В. В.** Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2010. — № 12. — С. 13–19.
3. **Kuzin, V. V.** Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools / V. V. Kuzin // Refract. Indust. Ceram. — 2010. — Vol. 51, № 6. — P. 421–426.
3. **Kern, Frank.** 10 — Design of ceramic materials for orthopedic devices / Frank Kern, Anke Bernstein, Andreas Killinger // Advances in Ceramic Biomaterials. — 2017. — P. 331–353.
4. **Кузин, В. В.** Проектирование технологических процессов изготовления деталей из Si_3N_4 -керамики с учетом требуемой дефектности кромок / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 9. — С. 65–68.
5. **Kuzin, V.** Designing of details taking into account degradation of structural ceramics at exploitation / V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Volosova, M. Fedorov // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vols. 752/753. — P. 268–271.
6. **Kumar, Vijay.** Processing and design methodologies for advanced and novel thermal barrier coatings for engineering applications / Vijay Kumar, Balasubramanian Kandasubramanian // Particuology. — 2016. — Vol. 27. — P. 1–28.
7. **Кузин, В. В.** Разработка и исследование режущих инструментов из нитридной керамики с покрытием / В. В. Кузин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2006. — № 9. — С. 48–52.
8. **Su, Honghong.** Thermal shock resistance of alumina ceramics enhanced by nanostructured conformal coatings using metal-organic frameworks / Honghong Su, Guohui Hou, Zhiqiang Cheng [et al.] // Scripta Mater. — 2016. — Vol. 119. — P. 38–42.

9. **Vereschaka, A. A.** Specifics of application of cutting ceramics with functional coating in turning of high-strength materials / A. A. Vereschaka, A. S. Vereschaka, B. Y. Mokritskii [et al.] // Mater. Sci. Forum. — 2016. — Vol. 857. — P. 221–227.
10. **Kuzin, V.** Surface defects formation in grinding of silicon nitride ceramics / V. Kuzin, S. Grigoriev, S. Fedorov, M. Fedorov // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vol. 752/753. — P. 402–406.
11. **Chaix, J. M.** Quantitative analysis of microstructure and modeling of sintering / J. M. Chaix // Mater. Sci. Forum. — 2009. — Vol. 624. — P. 1–18.
12. **Волосова, М. А.** Исследование и систематизация поверхностных и объемных дефектов инструментальной керамики и основных направлений ее совершенствования / М. А. Волосова // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2015. — № 5 (125). — С. 3–8.
13. **Zou, C. B.** Establishment of the low defect ceramic cutting tool database / C. B. Zou, C. Z. Huang, B. Zou, Y. H. Fei [et al.] // Key Engineering Materials. — 2014. — Vols. 589–590. — P. 357–360.
14. **Grigoriev, S.** The stress-strained state of ceramic tools with coating / S. Grigoriev, V. Kuzin, D. Burton [et al.] // Proceedings of the 37th International MATADOR 2012 Conference. — 2013. — P. 181–184.
15. **Yang, Yao.** Numerical investigation on the bond strength of a SiCN-based multi-layer coating system / Yao Yang, Ningbo Liao, Miao Zhang [et al.] // J. Alloys Compd. — 2017. — Vol. 710. — P. 468–471.
16. **Кузин, В. В.** Работоспособность режущих инструментов из нитридной керамики при обработке чугунов / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2004. — № 5. — С. 39–43.
17. **Kuzin, V. V.** Effectiveness of the nitride ceramic cutting tools in machining the gray irons / V. V. Kuzin // Russian Engineering Research. — 2004. — Vol. 24, № 5. — P. 21–27.
17. **Кузин, В. В.** Напряженное состояние границы между керамикой и покрытием под действием сило-

вых нагрузок / В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 4. — С. 38–44.

Kuzin, V. V. The stressed state of the boundary between ceramic and a coating under the effect of power loads / V. V. Kuzin, M. Y. Fedorov // Refract. Industr. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 2. — P. 192–198.

18. **Григорьев, С. Н.** Влияние свойств керамики на напряженно-деформированное состояние режущей пластины в условиях установившейся теплопроводности / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, Д. Буртон [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 4. — С. 76–80.

Grigor'ev, S. N. Influence of ceramic properties on the stress-strain state of a plate in steady heat conduction / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, M. N. Morgan, A. D. Batako // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 4. — P. 374–379.

19. **Кузин, В. В.** Влияние покрытия TiC на напряженно-деформированное состояние пластины из высокоплотной нитридной керамики в условиях нестационарной термоупругости / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2013. — № 9. — С. 52–57.

Kuzin, V. V. Effect of a TiC coating on the stress-strain state of a plate of a high-density nitride ceramic under nonsteady thermoelastic conditions / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refract. Industr. Ceram. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 376–380.

20. **Кузин, В. В.** Напряженное состояние границы между керамикой и покрытием под действием комбинированной нагрузки / В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 6. — С. 43–48.

Kuzin, V. V. Stressed state of a boundary between ceramic and coating under action of a combined load / V. V. Kuzin, M. Y. Fedorov // Refract. Industr. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 308–312.

21. **Кузин, В. В.** Влияние параметров силового воздействия на неоднородность напряжений на границе между нитридной керамикой и TiC-покрытием / В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2017. — № 10. — С. 54–59.

22. **Григорьев, С. Н.** Автоматизированная система термочислотных расчетов керамических режущих пластин / С. Н. Григорьев, В. И. Мяченков, В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2011. — № 11. — С. 26–31.

Grigor'ev, S. N. Automated thermal-strength calculations of ceramic cutting plates / S. N. Grigor'ev, V. I. Myachenkov, V. V. Kuzin // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31, № 11. — P. 1060–1066.

23. **Кузин, В. В.** Микроструктурная модель керамической режущей пластины / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2011. — № 5. — С. 72–76.

Kuzin, V. V. Microstructural model of ceramic cutting plate / V. V. Kuzin // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31, № 5. — P. 479–483.

24. **Кузин, В. В.** Математическая модель напряженно-деформированного состояния керамической режущей пластины / В. В. Кузин, В. И. Мяченков // Вестник машиностроения. — 2011. — № 10. — С. 75–80.

Kuzin, V. V. Stress-strain state of ceramic cutting plate / V. V. Kuzin, V. I. Myachenkov // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31, № 10. — P. 994–1000.

25. **Kuzin, V.** Method of investigation of the stress-strain state of surface layer of machine elements from a sintered nonuniform material / V. Kuzin, S. Grigor'ev // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 486. — P. 32–35. ■

Получено 14.11.17

© В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров,
М. А. Волосова, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Tecnargilla 2018 — международная выставка технологий и оборудования для производства керамики и кирпича



**THE FUTURE
OF CERAMICS**

24–28 сентября 2018 г. г. Римини, Италия

- Оборудование и методы производства
- Сырье и вспомогательные вещества
- Изделия и оборудование для художественной обработки
- Архитектурная и сантехническая плитка
- Лабораторное, измерительное и регулировочное оборудование
- Инновационные продукты

TECNARGILLA



KROMATECH



CLAYTECH

<http://en.tecnargilla.it/>